

UDC 678.067.9:
620.178.322.3:
536.48

航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-346

低温におけるCFRP多層積層材の層間せん断強度と
曲げ強度

松 嶋 正 道 ・ 古 田 敏 康

1978年3月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

低温におけるCFRP多層積層材の層間せん断強度と 曲げ強度*

Inter Laminar Shear Strength of CFRP Laminated Plate at a Low Temperature

松 嶋 正 道* ・ 古 田 敏 康*

1. はし が き

航空機構造材としてカーボン複合材(CFRP)を用いる場合には一般に多層積層材が用いられ、使用する樹脂はエポキシ樹脂が多く、しかも耐熱性のある変性エポキシ樹脂が多く用いられている。航空機の場合には上空で-40℃~-50℃の環境にさらされるので、CFRPの低温側の特性を知る事が必要であり、現在この種のデータはない。複合材の各種強度のうち温度に一番敏感なのは層間せん断強度である。そこでここでは標準エポキシ樹脂DX-210、変性エポキシ樹脂#241、#3130、#3501などを使ったCFRPの多層積層材(0°, ±45°, 90°)×24層について常温(+25℃)から-45℃迄の層間せん断強度を求め、さらに一部のCFRP材については常温と低温時の3点曲げ強度を求めた。

2. 試 験 材 料

ここで用いた試験片素材のカーボン繊維とエポキシ樹脂の組合わせを表1に示す。ここでカーボン繊維のASはM社、T-300はT社、Z-3はN社の高強度カーボン繊維の商品名である。つきにエポキシ樹脂ではDX-210はシェル化学の標準樹脂で、#3501はM社、#3130はT社、#241はN社の変性エポキシ樹脂である。

試験片は300×300×3mmの大きさに成型した。まずカーボンのプリプレグ(prepreg)を0°, ±45°, 90°の方向に24層積層後、オートクレーブで加圧、加熱して製作した。プリプレグとは繊維をシート状にそろえ、それに樹脂を含浸させ、それを半乾燥(予備硬化またはBstageともいう)させたものである。

3. 試 験 法

3.1 層間せん断試験

層間せん断試験法にはいろいろな方法があるが、こ

ではカーボン複合材(CFRP)の試験法に広く用いられているショートビーム法を採用した。層間せん断試験片は前記のものから幅10mm、長さ25mmに切断して作った。その原理図を図1に示す。試験片の中立面に働く最大層間せん断力(τ)はつぎのように求まる。

$$\tau = \frac{3}{4} \frac{P}{bh} = \frac{3}{4} \frac{P}{A} \quad (1)$$

ここで b は試験片の幅で、 h は厚さで、 A は断面積で、 P は最大荷重である。この場合に中央支点部の曲率半径を余り小さくすると、試験片の中央部で、軸と直角方向の曲げせん断破壊を起こしやすいため、ここでは中央支

表1 CFRP試験片の繊維と樹脂の組合せ

繊 維	樹 脂	摘 要
A S	DX-210	一方向強化材 (M社)
T-300	DX-210	" (T社)
A S	#3501	多層積層材* (M社)
T-300	#3130	" (T社)
Z-3	#241	" (N社)

* (0°, ±45°, 90°)×24層 $V_f \doteq 60\%$

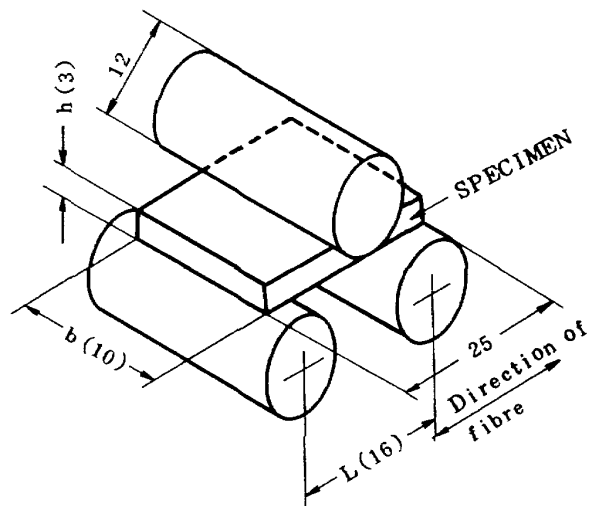


図1 層間せん断試験法

*機体第一部 昭和52年10月13日 受付

点部の曲率半径を 6 mmR とした。また試験片の厚さ(h)と、スパン(L)の比, すなわち L/h の比を約 5 とした。他の CFRP の場合¹⁾でもこの方法でよい結果を得た。

3.2 曲げ強度試験

曲げ強度試験法には 3 点曲げ法と, 4 点曲げ法とがあり, 最近の複合材では殆んど 4 点曲げ法が採用されているが, 低温試験用恒温槽の設備の都合上, ここでは 3 点曲げ法を採用した。図 2 に示すとおりで, 試験片の幅を 10 mm にとり, 長さを 100 mm とし, スパンを 80 mm とした。中央の支点部の曲率を 12.5 mmR と大きくとり, 中央部でのせん断破壊を防ぐようにした。曲げ強度(σ_b)はつぎの通り求まる。

$$\sigma_b = \frac{M}{Z} = \frac{PL}{4} \frac{6}{bh^2} = \frac{3}{2} \frac{PL}{bh^2} \quad (2)$$

$$Z = \frac{bh^2}{6}, \quad M = \frac{PL}{4} \quad (3)$$

3.3 低温用恒温槽

恒温槽はオートグラフの附属設備で, オートグラフ試験機の枠の中におさめられる。これを図 3 に示す。温度は +250℃ から -70℃ の範囲に変えられる。低温の温度制御は ±2℃ で比較的精度はよい。熱電対を炉内の 4 箇所と試験片の近くに設定し, 温度はデジタル温度計で監視した。試験片は設定温度にしてから 30 分間保持後実験を行った。

4. 試験結果

4.1 層間せん断強度

一方向強化材の CFRP と, 多層積層材の CFRP について, 標準エポキシ樹脂と変性エポキシ樹脂について常温(+25℃)から低温(-45℃)迄の層間せん断強度を求め各種の CFRP の特性の比較を行った。

一方向強化材についてはエポキシ樹脂は標準型の DX-210 を用い, カーボン繊維は AS (M 社), T-300 (T 社) を用いた。

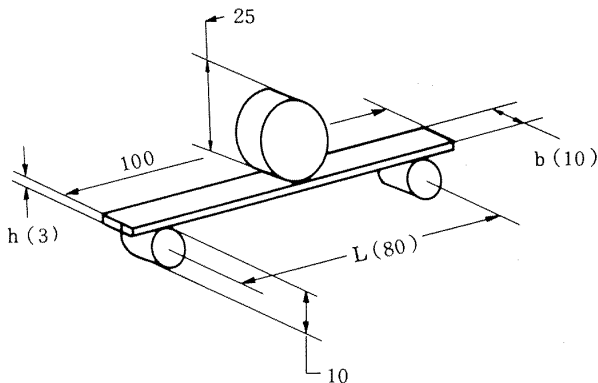


図 2 3 点曲げ強度試験法

一方多層積層材は AS / #3501, T-300 / #3130, Z-3 / #241 などの組合わせとした。記号の前者はカーボン繊維の種類を示し, 後者の記号はエポキシ樹脂を示す。

4.1.1 AS / DX-210 (M 社) 一方向強化材

この場合の温度に対する層間せん断強度を図 4 に示す。縦軸が層間せん断強度(τ)で, 横軸が温度を示す。以下同様である。各実験は 5 個ずつ行ない, その平均値を丸印で示し, バラツキを縦の太線で示す。常温の値は約

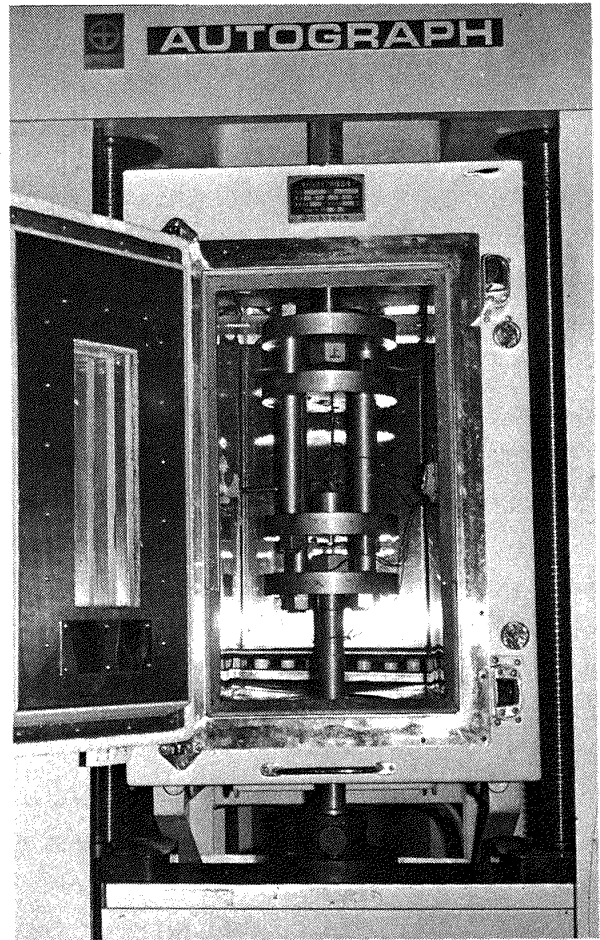


図 3 低温試験用恒温装置

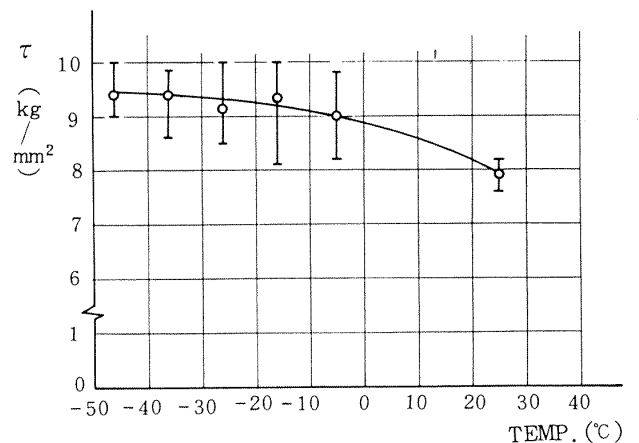


図 4 AS / DX-210 一方向強化材の層間せん断強度

7.9 kg/mm² で、-45℃では約 9.4 kg/mm² となり、この場合には低温になると約19%も層間せん断強度が増加していることがわかった。

4.1.2 T-300/DX-210 (T社)一方向強化材

この場合の温度に対する層間せん断強度を図5に示す。常温の値は 8.6 kg/mm² で、-45℃の値は 11.2 kg/mm² で、低温になると約30%も層間せん断強度が増加している。前者に比較して全体的に層間せん断強度は増加している。これはカーボン繊維とエポキシ樹脂との界面の接着強度が、前者より優れているためと思われる。しかしカーボン繊維は温度に対してきわめて安定であるが、²⁾エポキシ樹脂は温度によって特性が変わってくる。³⁾従って本実験の場合も低温時の層間せん断強度は主としてエポキシ樹脂の特性に依存するものと思われる。

4.1.3 T-300/#3130 (T社)多層積層材

この場合の温度に対する層間せん断強度を図6に、層間せん断線図を図7のA)に示す。#3130 変性エポキシ樹脂はT社で作ったものである。常温の値が7.0 kg/mm² で、-45℃が7.7 kg/mm² で、低温において約10%層間せん断強度が増加している。なお常温における同じ組合わせの一方強化材CFRPの層間せん断強度は 12.4 kg/mm² ⁴⁾であるから多層積層材では約56%に低下することがわかった。層間せん断線図は常温と低温のときでも同じ傾向の線図となり、一方強化材のとき¹⁾とも同じ傾向の線図となった。ここでPは荷重で、δは変位である。

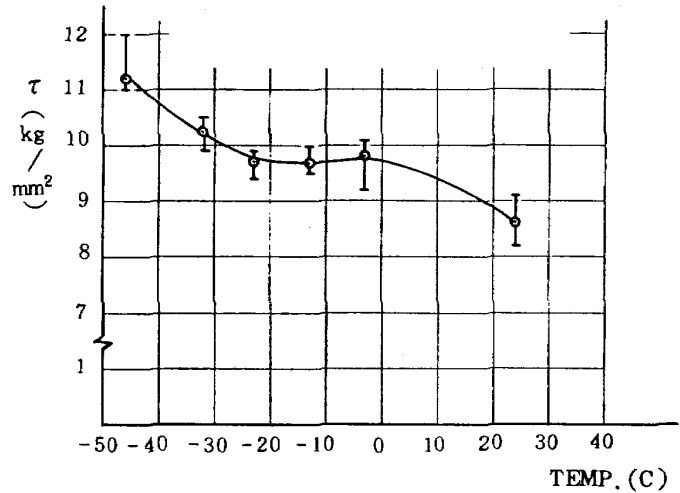


図5 T-300/DX-210 一方向強化材の層間せん断強度

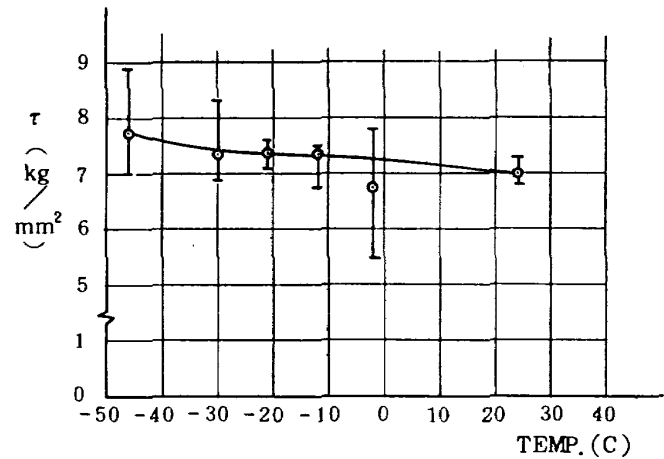


図6 T-300/#3130 多層積層材の層間せん断強度

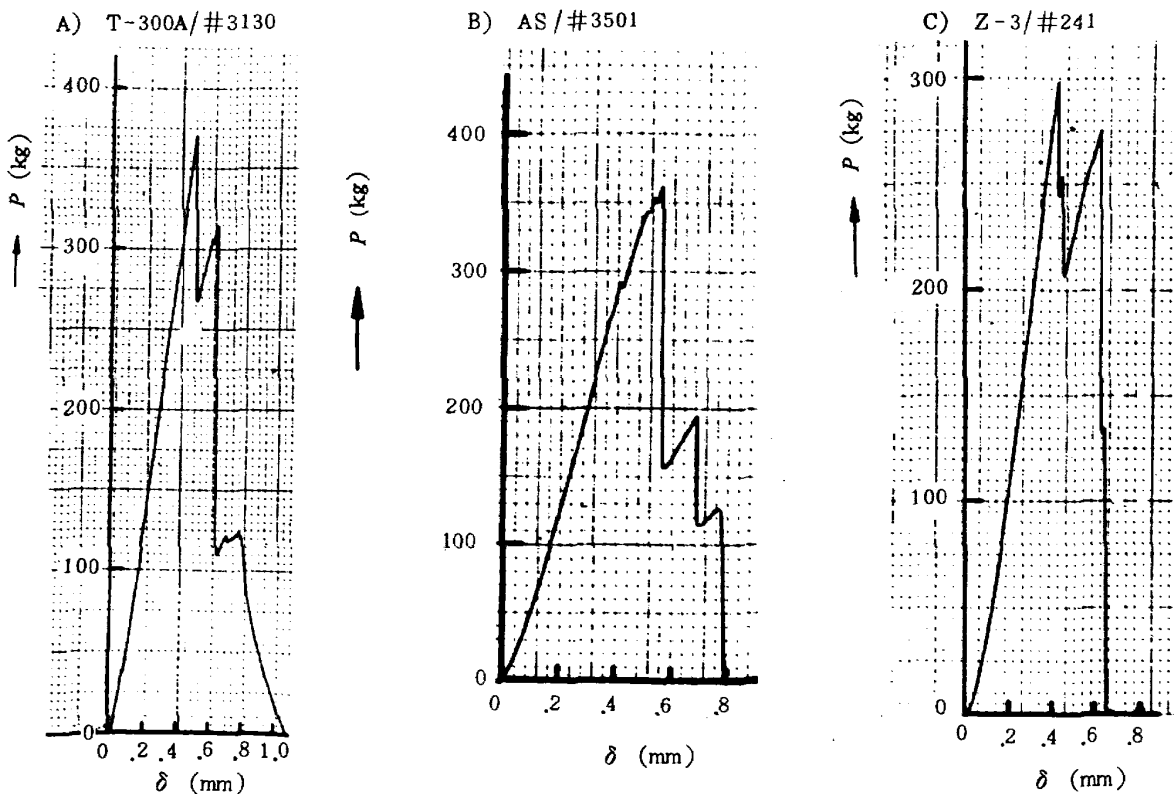


図7 多層積層材の層間せん断線図

4.1.4 AS/#3501 (M社)多層積層材

この場合の温度に対する層間せん断強度を図8に、層間せん断線図を図7のB)に示す。#3501 変性エポキシ樹脂はM社で作ったものである。常温の値が約 8.3 kg/mm² で、-45℃では 7.6 kg/mm² で、約 9.0% 低下している。なお一方向強化材のCFRPでは 12.3 kg/mm² であるから、この場合にも多層積層材にすると約 67% に低下する。

4.1.5 Z-3/#241 (N社)多層積層材

この場合の温度に対する層間せん断強度を図9に、層間せん断線図を図7のC)に示す。#241 変性エポキシ樹脂はN社で作ったものである。常温の値が 6.8 kg/mm² で、-40℃の値が 6.0 kg/mm² で、低温において約 12% 低下している。なお常温における同じ一方向強化材CFRPでは 12.7 kg/mm² ²⁾ であるから、多層積層材にすると約 54% に低下する。

4.2 低温における3点曲げ強度

製作した試験片の数が少なかったため、全部のCFRPについて実験は出来なかった。ここではAS/#3501についてのみ常温と-40℃についての3点曲げ強度を求めた。表2が常温(25.2℃)における3点曲げ強度で、表3が-40℃における3点曲げ強度の実験値で、 \bar{X} は強度の平均値で、 S は標準偏差、 $C.V.$ は変動率を表わす。いずれも各4個の実験を行った。図10が-40℃における破断迄の荷重(P)と変位(δ)の線図で、常温と同じ傾向の線図になった。いずれも破断迄のカーブは直線となり、弾性破断の様子を示している。破断の写真を図11に示す。

常温における3点曲げ強度の平均値は 80 kg/mm² で -40℃における強度は 82.9 kg/mm² で、約 3.6% 強度は増加しているが、これは試験片の誤差の範囲にあるものと思われ、低温においては強度は低下しないことがわかった。

これらの結果をまとめたのが表4である。

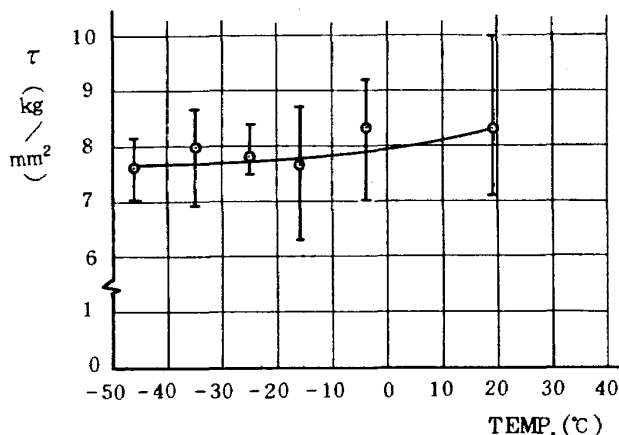


図8 AS/#3501 多層積層材の層間せん断強度

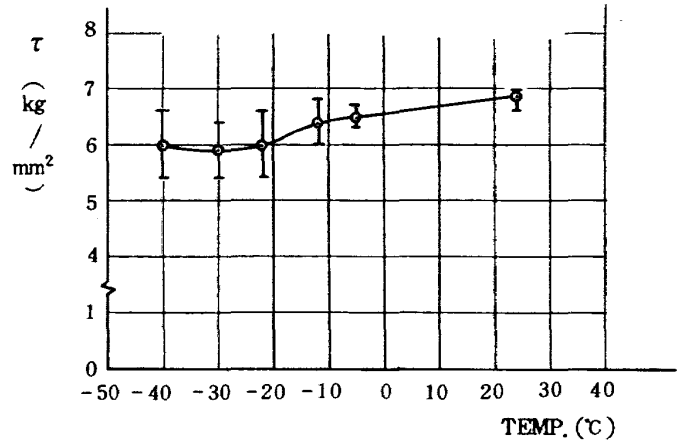


図9 Z-3/#241 多層積層材の層間せん断強度

表2 AS/#3501 の常温における3点曲げ強度
Temp. = 25.2℃

試験片	b (mm)	h (mm)	P (kg)	σ_B (kg/mm ²)
1	9.56	3.44	70	74.2
2	9.87	3.71	86	76.0
3	9.66	3.50	85	86.2
4	9.89	3.45	82	83.6

$\bar{X} = 80 \text{ kg/mm}^2$, $S = 5.79 \text{ kg/mm}^2$, $C.V. = 7\%$

表3 AS/#3501 の低温における3点曲げ強度
Temp. = -40℃

試験片	b (mm)	h (mm)	P (kg)	σ_B (kg/mm ²)
1	9.63	3.45	85	89.0
2	9.90	3.45	80	81.5
3	9.76	3.41	77	78.8
4	9.96	3.40	79	82.3

$\bar{X} = 82.9 \text{ kg/mm}^2$, $S = 4.32 \text{ kg/mm}^2$, $C.V. = 5\%$

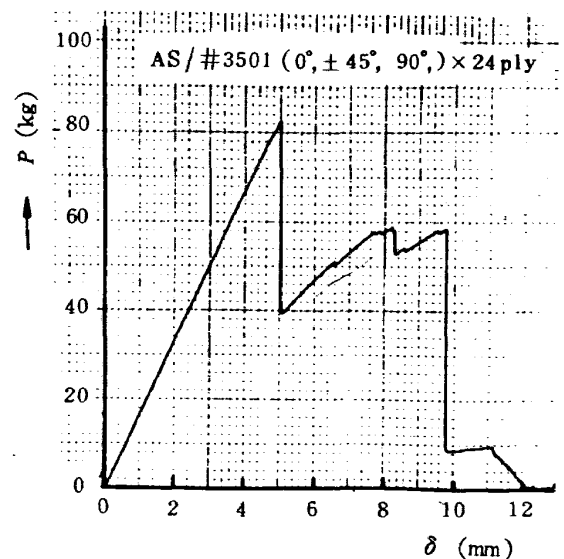


図10 -40℃における3点曲げ線図

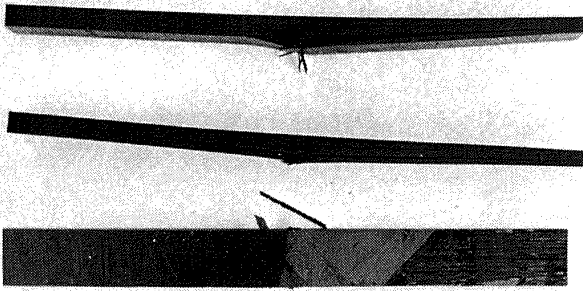


図11 3点曲げ破断試験片

表4 各種CFRPの常温、低温の層間せん断強度

(kg/mm²)

CFRP	一方向強化材		多層積層材*	
	+25℃	-45℃	+25℃	-45℃, -40℃
AS/DX-210	7.9	9.4	—	—
T-300/DX-210	8.6	11.2		
T-300/#3130	12.4	—	7.0(0.56)	7.7
Z-3/#241	12.7	—	6.8(0.54)	6.0 □
AS/#3501	12.3	—	8.3(0.67)	7.6

* (0°, ±45°, 90°) × 24 ply

()は一方向強化材と多層積層材の比

5. あとがき

以上の実験により、CFRPの強度のうち一部分ではあ

るが、低温時における層間せん断強度と曲げ強度の相関性が解明できた。以上をまとめるとつぎのとおりである。

1) 一方向強化材CFRPに対し、多層積層CFRPの層間せん断強度は使用した樹脂により多少の差はあるが60%前後に強度が低下する。

2) -45℃では、多層積層CFRPの層間せん断強度は一部のものはやや向上するが、他のものはそれ程強度の低下はない。(9~12%程度の低下)

3) 曲げ強度は一部について実験を行った結果では強度の低下はなく、他のCFRPにも推測できる。

複合材を航空機の構造材に応用する場合には上空で-40℃~-50℃の温度にさらされる。そこでこれらの実験データは構造設計に貴重な資料となるものと思われる。

最後にこの報告書をまとめるにあたり、カーボン繊維については、日本カーボン(株)、三菱レイヨン(株)、東レ(株)の関係者に、複合材の成形については三菱重工(株)加工研の酒谷芳秋、山口泰弘両氏に大変御世話になった事を感謝致します。

文 献

- 1) 古田, 野口, 松嶋: カーボン複合材の強度特性, 航技研資料, TM-241 1973年6月
- 2) 古田: カーボン, ボロン複合材の宇宙航空機構造への応用, 航技研資料 N-14 1971年9月
- 3) 越出: 高分子材料のひずみ解析に対するモアレ法の応用, 航技研報告 TR-470 1976年9月
- 4) 古田, 松嶋, 野口: 各種カーボン複合材の静的強度特性, 航技研資料 TM-330 1977年4月

航空宇宙技術研究所資料346号

昭和53年3月発行

発行所 航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺町1880
電話武蔵野三鷹(0422)47-5911(大代表)〒182
印刷所 株式会社 共 進
東京都杉並区久我山4-1-7(羽田ビル)
